



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

# ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DEL PROCESO ROLLER HEMMING

Autor

**Daniel Ortigosa Val**

Director

**Emilio Royo Vázquez**

Universidad de Zaragoza | Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Máster en Ingeniería Mecánica | 2018



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. DANIEL ORTIGOSA VAL,

con nº de DNI 72999884T en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Máster \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DEL PROCESO ROLLER HEMMING

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de septiembre de 2018

Fdo: Daniel Ortigosa Val

# ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DEL PROCESO ROLLER HEMMING

## ~ RESUMEN ~

El presente trabajo se centra en un análisis de sensibilidad del proceso de engrapado mediante rodillo (*roller hemming*). Este proceso consiste en la unión doblada de dos láminas mediante deformación plástica sin el uso de ningún elemento de fijación adicional, eliminando las aristas abiertas. Ello se lleva a cabo en varios pasos mediante un rodillo paralelo a la pestaña que va cerrando la unión, donde el borde de la lámina metálica exterior se dobla sobre la interior creando el engrapado.

El análisis pretende estudiar la influencia de distintos parámetros del proceso *roller hemming* sobre variables de calidad del producto final, especialmente sobre el enrollamiento de la chapa o *roll-in*.

Para ello, se establecen los parámetros más influyentes del proceso y se lleva a cabo un diseño de experimentos para analizar su influencia en el *roll-in*.

En el trabajo fin de máster se realiza un análisis de sensibilidad mediante simulación por elementos finitos de la operación y, posteriormente, mediante un estudio experimental en laboratorio en un puesto desarrollado específicamente para este proceso, aplicado a una pestaña recta. Se comparan resultados y se reflexiona sobre la metodología de estudio y equipos empleados, para extraer conclusiones y aportar líneas futuras de investigación.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
2.	ESTADO DEL ARTE .....	8
2.1	PROCESO HEMMING .....	8
2.2	ROBOT ROLLER HEMMING .....	11
2.3	CALIDAD Y DEFECTOS DEL PROCESO HEMMING .....	12
3.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	14
4.	SOFTWARE DE SIMULACIÓN .....	18
5.	ENSAYO EXPERIMENTAL .....	21
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24
6.1	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	24
6.2	RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	27
7.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	30
8.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....	32
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	34
	ANEXO 1. PROCESO DE SIMULACIÓN.....	35
	ANEXO 2. PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN.....	38

## ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Esquema Hemming</i> .....	8
<i>Ilustración 2. Engrapado con prehemming en 2 pasos</i> .....	9
<i>Ilustración 3. Instalación die hemming</i> .....	9
<i>Ilustración 4. Movimiento vertical prehemming (izda.) y final hemming (dcha.)</i> .....	9
<i>Ilustración 5. Instalación table top hemming</i> .....	10
<i>Ilustración 6. Proceso robot roller hemming</i> .....	10
<i>Ilustración 7. Estaciones robot roller hemming</i> .....	11
<i>Ilustración 8. Movimiento a lo largo del borde (izda.) y ángulos de ataque del rodillo (dcha.)</i> .....	11
<i>Ilustración 9. Defectos superficiales warp, recoil, wrinkling y splitting</i> .....	12
<i>Ilustración 10. Distancia entre partes con engrapado o gap</i> .....	13
<i>Ilustración 11. Defecto dimensional roll-in</i> .....	13
<i>Ilustración 12. Distancia TCP-RTP esquemática (izda.) y en AutoForm (dcha.)</i> .....	15
<i>Ilustración 13. Orientación del rodillo esquemática (izda.) y en AutoForm (dcha.)</i> .....	15
<i>Ilustración 14. Overhang esquemático</i> .....	16
<i>Ilustración 15. Herramienta roller hemming de AutoForm</i> .....	18
<i>Ilustración 16. Lámina simulación AutoForm</i> .....	19
<i>Ilustración 17. Gráficos de fuerzas del proceso roller hemming simulado</i> .....	21
<i>Ilustración 18. Célula de trabajo roller hemming experimental</i> .....	22
<i>Ilustración 19. Probeta hemming final experimento</i> .....	22
<i>Ilustración 20. Gráfica de Pareto de efectos estandarizados de la simulación</i> .....	24
<i>Ilustración 21. Gráfica normal de efectos estandarizados de la simulación</i> .....	25
<i>Ilustración 22. Gráfica de efectos principales de la simulación</i> .....	26
<i>Ilustración 23. Gráfica de interacción de los efectos de la simulación</i> .....	26
<i>Ilustración 24. Gráfica de Pareto de efectos estandarizados de la experimentación</i> .....	27
<i>Ilustración 25. Gráfica normal de efectos estandarizados de la experimentación</i> .....	28
<i>Ilustración 26. Gráfica de efectos principales de la experimentación</i> .....	28
<i>Ilustración 27. Gráfica de interacción de los efectos en la experimentación</i> .....	29
<i>Ilustración 28 Gráficas de cubos de la experimentación (arriba) y la simulación (dcha.)</i> .....	31
<i>Ilustración 29. Operación de flanging en AutoForm</i> .....	35
<i>Ilustración 30. Rodillo para simulación en AutoForm</i> .....	35
<i>Ilustración 31. Simulación prehemming</i> .....	36
<i>Ilustración 32. Simulación final hemming</i> .....	36
<i>Ilustración 33. Hemming Cross Section de AutoForm</i> .....	37
<i>Ilustración 34. Valor medio de roll-in mediante 3 datos</i> .....	37
<i>Ilustración 35. Diseño y fotografía de la célula de experimentación</i> .....	38
<i>Ilustración 36. Sujeción de las probetas para experimentación</i> .....	39
<i>Ilustración 37. Momentos del proceso de experimentación en la célula de trabajo</i> .....	40
<i>Ilustración 38. Imágenes de las probetas resultantes de la experimentación</i> .....	45
<i>Ilustración 39. Fallos en experimentación</i> .....	46
<i>Ilustración 40. Marcas de las medidas de resultados de la probeta por debajo</i> .....	47

## 1. INTRODUCCIÓN

Un análisis de sensibilidad consiste en la caracterización de un proceso para identificar cuáles son los factores más importantes de dicho proceso, la interacción entre ellos y evaluar su influencia en el resultado.

Durante el presente trabajo fin de máster, se va a presentar el proceso de engrapado mediante rodillo o *roller hemming* y se va a tratar de llevar a cabo un análisis de sensibilidad. Para ello, se va a reproducir el proceso mediante el módulo de un software de simulación relativamente nuevo, por lo que se realizará una introducción al programa definiendo cómo se lleva a cabo la experimentación y se tratará de comparar con la operación real, desarrollando el proceso en el taller. Para el apartado experimental se llevará a cabo una célula de trabajo específica para este estudio a través de los medios disponibles en el taller del Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación, dentro del Área de Ing. de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Zaragoza. Todo ello se aplica a un engrapado de borde recto dadas las limitaciones del equipo de taller.

En el capítulo de estado del arte se va a definir el proceso *hemming* en general, con sus variantes y su evolución. Mediante una revisión bibliográfica previa se presentan las diferentes tecnologías existentes, los detalles de cada una de ellas, los defectos que aparecen tras cada operación y por qué este estudio se centra en el *roller hemming* y su aplicación. Esto explica por qué es tan importante el defecto *roll-in* y por qué de ahí en adelante pasa a ser la variable respuesta a analizar. Las fuentes consultadas se especifican en la bibliografía final del trabajo, del que cabe destacar la tesis “*Simulation of the Robot Roller Hemming process*” para Voestalpine Polynorm Automotive con la Universidad de Twente, sobre el que se apoya esta investigación, para la definición de todo el proceso y del diseño de experimento.

Para proceder con el análisis de sensibilidad del proceso *roller hemming* se lleva a cabo un diseño de experimentos (*DoE*), capítulo durante el cual se presentan todos los parámetros que se van a someter a estudio. Para ello, es imprescindible evaluar cuáles son los factores más determinantes que participan del proceso y fijar sus parámetros de control dentro del proceso, tanto en la simulación, como en el taller, para que puedan formar parte del diseño de experimento. De esta forma, se plantean los experimentos necesarios para que se pueda identificar la influencia de los factores en la variable respuesta, en este caso sobre el *roll-in*, y la interacción entre ellos.

En el siguiente apartado, se presenta el software de elementos finitos con el que se van a llevar a cabo las simulaciones. Se ha optado por utilizar el programa AutoForm<sup>plus</sup> R7, ya que está a nuestra disposición dentro del Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación, y tiene integrado un paquete relativamente nuevo como es el AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup>, un módulo específico para simular el proceso *roller hemming*. De esta forma, además de estudiar los resultados obtenidos, podemos valorar el uso de esta herramienta desde un punto de vista experimental. Eso ha determinado tanto el tipo de experimento a estudiar, como la complejidad de las variables a estudio. Como ya tenemos definidos los parámetros de entrada y es posible una captación de datos orientada a este proceso en este nuevo módulo, se puede proceder con los experimentos definidos por el *DoE*.

Una de las partes más importantes de este trabajo es intentar llevar a cabo los experimentos planteados de manera experimental. De esta forma se podrían establecer comparaciones con la simulación y analizar si los resultados obtenidos son válidos para este proceso. Se ha tratado de imitar el proceso *roller hemming* y se ha optado por una operación simple de engrapado sobre chapa de acero de borde recto, para poder llevar a cabo este ensayo. Para ello, no solo ha sido necesario desarrollar un proceso de experimentación en el taller con los recursos a nuestra disposición, si no también tener en cuenta la capacidad para medir y tener bajo control todos los parámetros que se quieren someter a estudio. Eso ha conllevado varias dificultades, tanto técnicas, como de precisión, pero se han llevado a cabo, obteniendo resultados válidos para poder analizar.

Tras la realización de todos los experimentos definidos en el diseño de experimento, tanto en simulación, como en experimentación en taller, se procede en ambos casos al análisis de sensibilidad a través de los resultados obtenidos. Para ello, se utiliza un software estadístico que permite analizar los datos que hemos recolectado. Para ello, hemos optado por el programa Minitab, un software estadístico ampliamente reconocido que proporciona varias herramientas analíticas y gráficas para ayudar a entender los resultados y poder interpretarlos.

Una vez argumentados sendos capítulos de análisis tras las simulaciones y los ensayos experimentales, se analizan los resultados obtenidos y se establece una comparativa en ambos ámbitos, de donde se sacan conclusiones, proposiciones de mejora y se abre un camino de investigación a partir de este trabajo fin de máster.

A lo largo de este trabajo, se trata de plasmar todo lo aprendido durante este proceso, que abarca desde la revisión bibliográfica inicial, pasando por el diseño de experimentos, hasta la realización de éstos mediante desarrollo propio, abarcando todo el progreso de cada una de las fases y completando un interesante estudio desde el punto de vista ingenieril.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En el estado del arte de este trabajo se va a introducir al proceso *hemming* genérico para conocer las distintas tecnologías para llevar a cabo este proceso. El estudio se va a centrar en la tecnología *robot roller hemming* y se van a enumerar los distintos defectos que aparecen en la aplicación de esta tecnología, para dirigir el análisis a uno de ellos como variable respuesta de nuestro proceso.

### 2.1 PROCESO HEMMING

Como resultado del incremento constante de los requisitos de calidad dentro de la industria y, más todavía, en la industria de la automoción, cada vez es mayor la exigencia en la optimización de procesos. Esto ayuda a aumentar la calidad del producto y a reducir costes.

Para la producción de ensamblaje de cierres (partes de apertura como puertas y capós) una parte exterior se une con una parte interior, creando una unión doblada o engrapado y eliminando las aristas abiertas. Este método de ensamblaje se llama *hemming*.

El *hemming* o engrapado es el proceso consistente en la unión de dos láminas de metal mediante deformación plástica sin el uso de ningún elemento de fijación adicional. El borde de la lámina metálica exterior se dobla sobre la interior creando el engrapado. En algún caso, se puede llevar a cabo sin realizar ninguna unión, simplemente realizar el cierre para eliminar dichas aristas abiertas con fines de seguridad o estéticos.



Ilustración 1. Esquema Hemming

Para realizar este proceso de forma automatizada existen diferentes tecnologías. A lo largo del tiempo se han ido desarrollando diferentes maneras de llevar a cabo el proceso, dada su importancia dentro de la industria y la necesidad de garantizar mejor calidad final del producto con el menor coste posible. Entre ellas, se encuentra *tabletop hemming* y *die hemming*, que fueron las primeras y más extendidas, que se realizan mediante prensa, o *robot roller hemming*, una técnica más novedosa, basada en la flexibilidad que ofrece un brazo robótico, sobre la que se va a centrar este estudio.



Todos los procesos de hemming constan básicamente de los mismos pasos, un primer doblado a  $90^\circ$  o *flanging*, uno o varios pasos de *prehemming*, y un *final hemming* para completar el cierre del engrapado.



Ilustración 2. Engrapado con prehemming en 2 pasos

Como se ha comentado anteriormente, tanto el *die hemming*, como el *tabletop*, son procesos de engrapado que se realizan mediante prensa. Permiten un alto volumen de producción, sin embargo, son procesos muy poco flexibles, con muy poca adaptabilidad. En los inicios de automatización de este proceso era lo más común, dado que se buscaba un gran volumen de producción, sin embargo, cada día la industria ha ido evolucionando hacia una mayor adaptabilidad que te permita regular la producción y adaptarla a la necesidad del momento.

Probablemente el *die hemming* es el proceso más antiguo de hemming automatizado, donde la prensa es universal, y hace falta crear las partes específicas de la matriz para el engrapado.

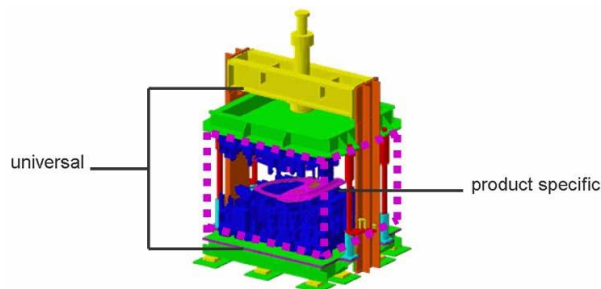


Ilustración 3. Instalación die hemming

Normalmente el proceso se lleva a cabo en 2 pasos, por lo que se necesitan 2 instalaciones diferentes para llevar a cabo la operación completa y el movimiento en este tipo de proceso es siempre vertical. La operación de lleva a cabo de una forma muy rápida y por ello es apto para un gran volumen de producción, pero para cambiar a nuevos productos hace falta sustituir la matriz entera.

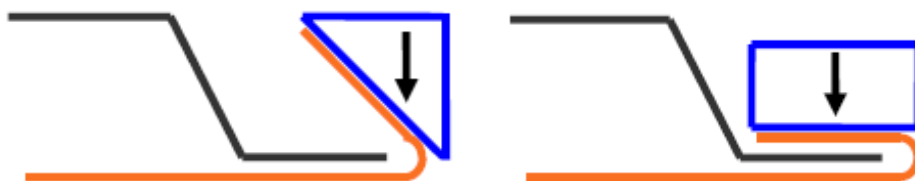


Ilustración 4. Movimiento vertical prehemming (izda.) y final hemming (dcha.)

Por su parte, para el **tabletop hemming** hace falta una instalación algo más sofisticada que la anterior, donde las herramientas para el *prehemming* realizan el engrapado desde un lado y el *final hemming* se lleva a cabo verticalmente, por lo que se necesita desarrollar la instalación entera específicamente para cada producto. Al igual que el *die hemming*, conlleva un gran volumen de producción, pero poca flexibilidad en el proceso.

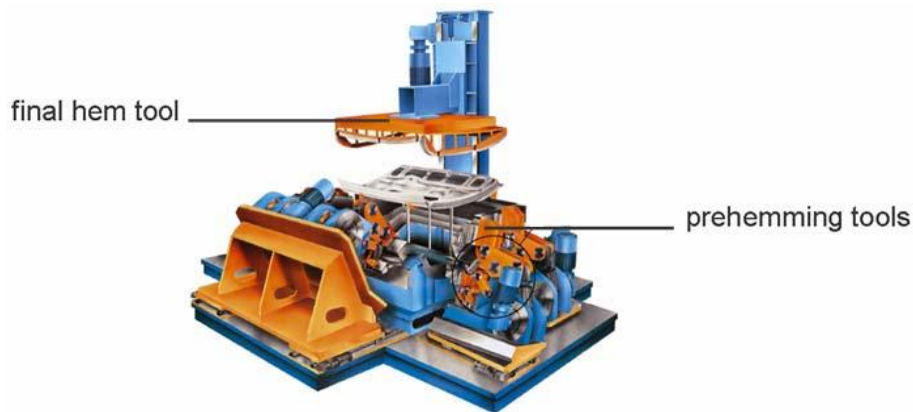


Ilustración 5. Instalación table top hemming

A partir de los años 90 se busca una modernización del proceso que permita mayor flexibilidad en la producción. Se empieza a desarrollar otro tipo de tecnología que permita una mayor adaptabilidad del proceso. Es por ello que aparece la tecnología **robot roller hemming**, una tecnología más novedosa que se lleva a cabo mediante un brazo robótico que realiza el proceso de engrapado mediante rodillos, en la que vamos a profundizar para evaluar diferentes características de ésta.



Ilustración 6. Proceso robot roller hemming

## 2.2 ROBOT ROLLER HEMMING

El proceso *robot roller hemming* es un proceso único debido a que su patrón de movimiento es completamente diferente al resto. Un robot guía un rodillo giratorio paralelo al borde de la lámina para producir el doblado. Al realizarse mediante un brazo robótico, existen muchas variantes de aplicación, con diferentes rodillos y distintas orientaciones que, junto a la posibilidad de trabajar en distintas estaciones, otorgan una gran flexibilidad en la cadena de producción.

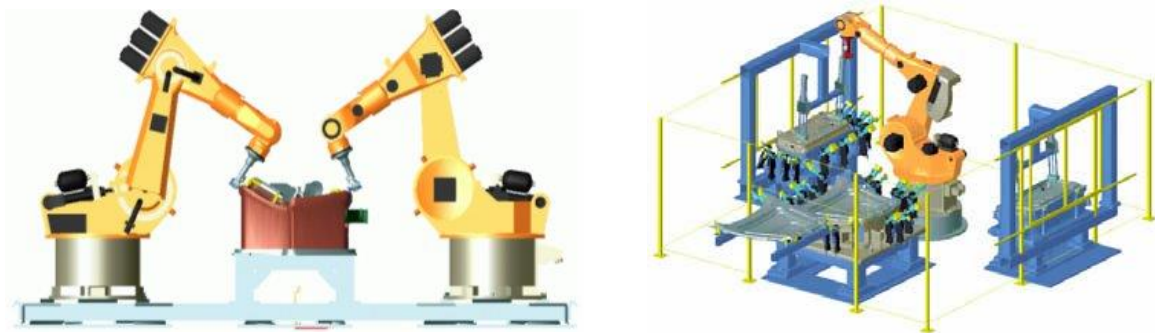


Ilustración 7. Estaciones robot roller hemming

El proceso *roller hemming* consta habitualmente de tres pasos. Una vez hecho el doblado a  $90^\circ$  o *flanging*, se realizan varias pasadas del rodillo paralelo al borde para ir cerrando la chapa exterior sobre la interior. En cada paso se varía la orientación del rodillo (el ángulo de ataque), lo que se denomina el *prehemming*, para completar el engrapado de la manera más uniforme posible en la última pasada, con el rodillo vertical y paralela a la chapa, el *final hemming*.

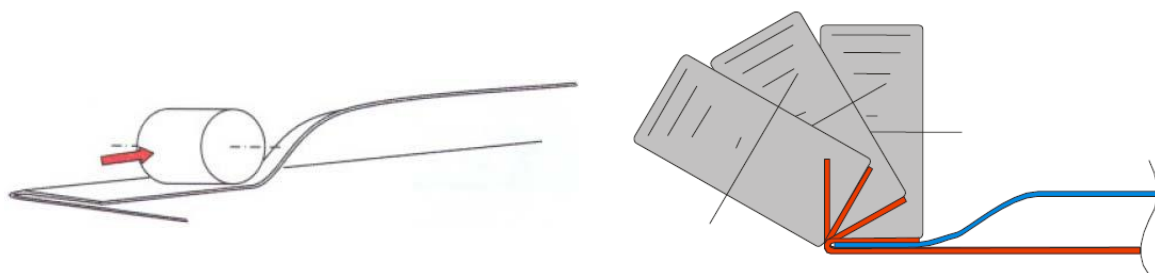


Ilustración 8. Movimiento a lo largo del borde (izda.) y ángulos de ataque del rodillo (dcha.)

Tras el *flanging* inicial a  $90^\circ$ , común en todos los procesos *hemming*, el *prehemming* se suele hacer en 2 etapas, por lo que, junto con el *final hemming*, lo más habitual es realizar la operación en 3 pasos, que suelen ser  $60^\circ$ - $30^\circ$ - $0^\circ$ . Si se opta por un único paso de *prehemming*, la operación se puede llevar a cabo en 2, con  $45^\circ$ - $0^\circ$ .

Como se ha introducido, el resultado del incremento constante de los requisitos de calidad en la industria cada vez es mayor la exigencia en la optimización de procesos. Esto ayuda a aumentar la calidad del producto y a reducir costes. Dado que este proceso es una operación relativamente nueva, hasta el momento las mejoras y análisis de este proceso se han basado en prueba y error.

La precisión en el proceso *roller hemming* es muy importante ya que afecta a la apariencia de la superficie y su calidad. Las deformaciones del material, que ocurren durante la operación, pueden provocar variaciones dimensionales y otros defectos típicos del engrapado, incluyendo roturas y arrugas en la pestaña, solapamientos del material en las esquinas y enrollamiento del material.

### 2.3 CALIDAD Y DEFECTOS DEL PROCESO HEMMING

Durante el engrapado se producen diferentes defectos en el doblado que hay que tener en cuenta para la preparación del proceso productivo. Dependiendo de la tecnología *hemming* que se utilice y los parámetros de cada proceso, aparecen algunos con mayor impacto en la calidad, por lo que hay que analizarlo para dimensionar bien la pieza final. Algunos afectan a la **calidad superficial**, como son el *warp* y el *recoil*, que es el pandeo de la parte inferior hacia dentro o hacia fuera, o como las arrugas y roturas (*wrinkling* y *splitting*), que varían mucho según el tipo de *hemming* que se utilice.

El *warp* y el *recoil* aparecen mayormente en operaciones de prensa (*tabletop* y *die hemming*), ya que el aplastamiento de la pestaña se realiza de golpe, haciendo que en la parte inferior aparezcan unas fuerzas de reacción por el ‘efecto palanca’, produciendo un pandeo de la lámina, mientras que las arrugas y roturas aparecen más pronunciadas durante el *roller hemming*, dado que el movimiento paralelo al borde y la deformación plástica hace que se acumule material (arrugas) o se sobre estire (roturas) conforme avanza el rodillo.

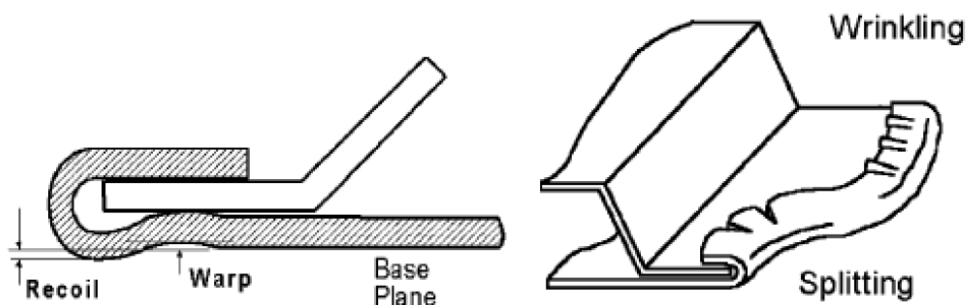


Ilustración 9. Defectos superficiales warp, recoil, wrinkling y splitting

Otro tipo de defectos afectan a la **calidad dimensional**, los cuales son muy importantes a la hora de dimensionar la pieza final. El más importante en este proceso es el enrollamiento de la chapa o *roll-in/roll out*, que hay que tener muy en cuenta ya que influye directamente en la distancia final entre distintas piezas o *gap*. Si no se controla bien este defecto, puede afectar de manera importante a la calidad final del ensamblaje entre piezas con este acabado, como las puertas o los capós de los automóviles.

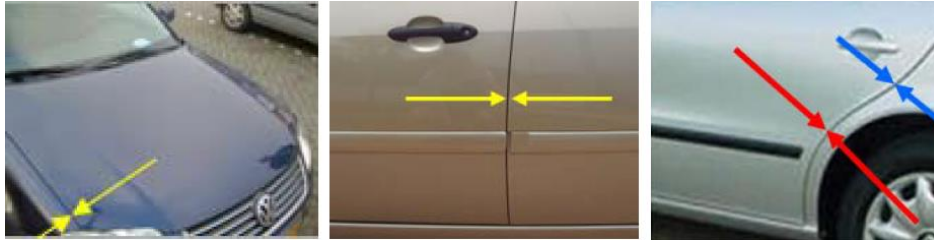


Ilustración 10. Distancia entre partes con engrapado o gap

El *roll-in* es el enrollamiento en la pestaña debido a la deformación plástica en la arista de contacto de la chapa con el rodillo. Esa deformación hace que pueda ser tanto positivo, como negativo, ya que el ángulo de ataque del rodillo también determina la dirección de enrollamiento.

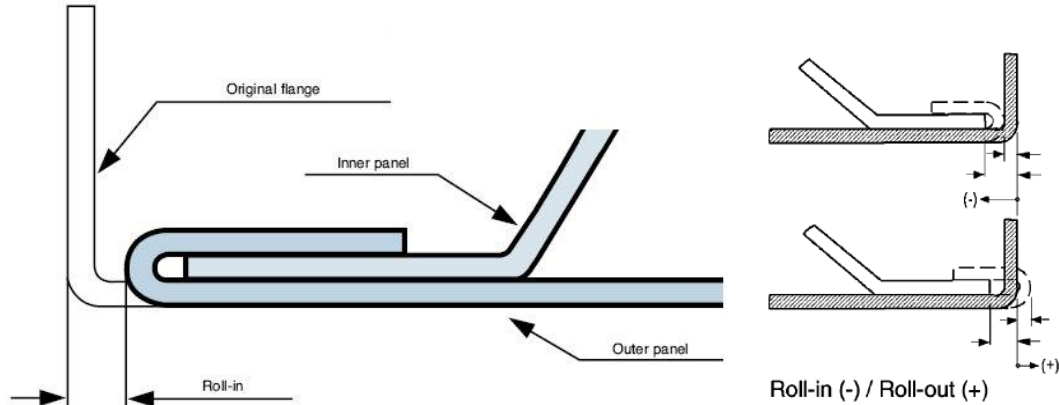


Ilustración 11. Defecto dimensional roll-in

Como se ha indicado anteriormente, la calidad final del producto cada vez es un punto más importante dentro de la cadena productiva, y la tecnología *robot roller hemming* no se ha analizado en profundidad para poder anticipar el defecto *roll-in* con precisión. Ello puede suponer problemas en el dimensionado de piezas, afectando a la distancia entre diferentes partes de cierres con engrapados. A lo largo del presente TFM se va a tratar de **analizar el *roll-in*** como variable respuesta mediante la simulación del proceso por elementos finitos y mediante experimentación, teniendo en cuenta los diferentes parámetros que influyen en la operación.

### 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se han introducido diferentes parámetros que pueden afectar a la calidad dimensional del proceso *roller hemming*. Para poder analizar cómo y en qué sentido influyen estos factores, se procede a realizar un diseño de experimentos. Con este procedimiento, se puede intentar optimizar un valor respuesta, que en este caso se corresponde con el *roll-in*.

Un diseño de experimentos o *DoE* (*design of experiments*) es un conjunto de experimentos donde son investigados diferentes variables de entrada (factores) simultáneamente sobre una variable de salida (respuesta). Estos experimentos consisten en una serie de corridas, o pruebas, en las que se realizan cambios intencionales en las variables de entrada, donde en cada prueba se recolectan datos. De esta manera, la influencia de diferentes factores se puede encontrar en menos tiempo del que se requeriría si cada factor se investigara de manera independiente. Con este diseño también se pueden identificar posibles interacciones entre los distintos parámetros. Existe una interacción entre los factores cuando un cambio de un factor influye en el efecto de otro en los resultados.

Por consiguiente, el siguiente paso para definir el diseño de experimentos y llevar a cabo el análisis de sensibilidad es establecer los parámetros de entrada. En el capítulo anterior se han introducido una serie de defectos en la chapa. Los factores más influyentes a la hora de su aparición y que definen el proceso son el ángulo de ataque de la herramienta, es decir, la orientación del rodillo, el tamaño del rodillo y las distancias entre la herramienta y la chapa durante el proceso. Tras la revisión bibliográfica de este proceso, queda bien documentado que el diámetro del rodillo afecta principalmente a la aparición de arrugas y roturas. Según la tesis "*Simulation of the Robot Roller Hemming process*", el tamaño del rodillo no afecta al *roll-in* final, por lo que sacamos este factor del diseño, quedando la orientación del rodillo y las distancias entre la herramienta y la lámina, que definiremos a continuación, como los factores que queremos estudiar.

Tras plantear los factores con los que se quiere realizar el diseño de experimento, se puede entrar a definir los **parámetros de entrada a analizar**, para los cuáles se va a estudiar su efecto sobre el enrollamiento de la chapa o *roll-in*.

Estos parámetros son los siguientes:

- ✓ **Distancia TCP-RTP:** el Tool Center Point (TCP) es el punto de referencia del rodillo, desde el cuál vamos a medir la distancia perpendicular al punto objetivo, mientras que el Robot Target Point (RTP) es el punto objetivo del rodillo, que está situado en la esquina de la cama de apoyo de la lámina.

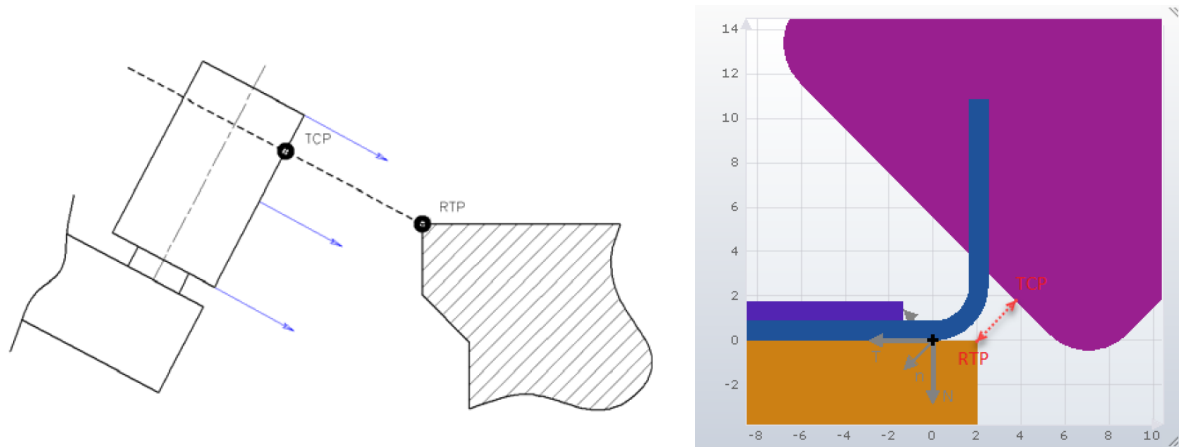


Ilustración 12. Distancia TCP-RTP esquemática (izda.) y en AutoForm (dcha.)

Cabe destacar que en el software AutoForm que se utilizará para la simulación, solo se permite tomar distancias desde el origen de coordenadas que se establece por defecto, que en este caso está en la base inferior de la chapa, donde acaba el contacto entre la chapa y la cama, y comienza la curvatura. Por ello debemos calcular la distancia TCP-RTP a partir de la distancia que nos permite controlar AutoForm con una simple conversión geométrica.

- ✓ **Orientación del rodillo:** es el ángulo de ataque del rodillo ( $\varphi$ ) respecto la horizontal de la lámina. La variación de este ángulo diferencia los distintos pasos del *prehemming* y el *final hemming*.

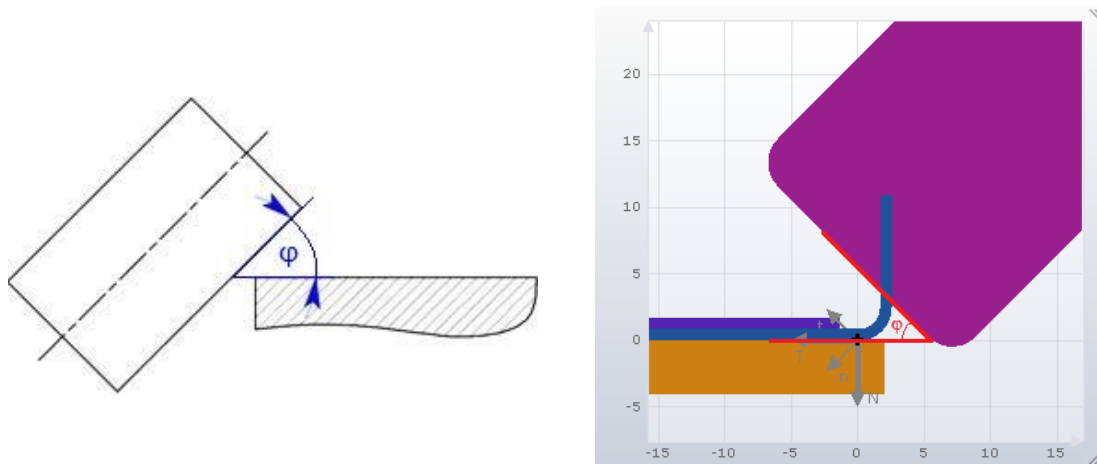


Ilustración 13. Orientación del rodillo esquemática (izda.) y en AutoForm (dcha.)

- ✓ **Overhang:** es la distancia entre la pared de la lámina después del flanging y la cama del proceso *hemming*. Esto determina distintas fuerzas reacción en el rodillo durante el proceso y pueden variar las tensiones y deformaciones resultantes.

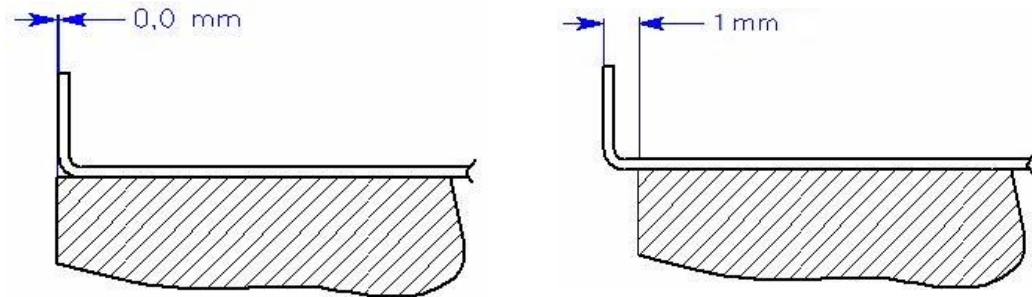


Ilustración 14. Overhang esquemático

Una vez definidos todos los parámetros de entrada, se puede proceder a realizar el diseño de experimentos y llevar a cabo las diferentes simulaciones y los diferentes ensayos experimentales, para analizar de forma estadística su influencia sobre la variable respuesta que queremos estudiar por separado, y así poder comparar resultados.

Para analizar los tres parámetros que se han identificado para este experimento se va a realizar un **diseño factorial completo**. El diseño factorial es un diseño del tipo  $2^k$  que utiliza 2 niveles de datos, el inferior (-1) y el superior (+1), para estudiar el impacto de los distintos factores utilizados en la variable respuesta. Este tipo de experimento es muy útil cuando se quieren estudiar varios factores. Para los 3 factores ( $k=3$ ) a estudiar se requieren 8 experimentos ( $2^3$ ):

Experimento	Factor A	Factor B	Factor C
EXP. 1	-1	-1	-1
EXP. 2	1	-1	-1
EXP. 3	-1	1	-1
EXP. 4	1	1	-1
EXP. 5	-1	-1	1
EXP. 6	1	-1	1
EXP. 7	-1	1	1
EXP. 8	1	1	1



Una vez establecido el diseño de experimentos y el número de factores, se define cuáles son los valores extremos de cada factor. En base a la consulta bibliográfica previa y a la experimentación, los niveles mínimos y máximos tomados para cada uno de los factores son los siguientes:

- Distancia TCP-RTP: La distancia entre el punto de medición del rodillo y la cama sobre la que apoya la chapa va a oscilar entre **2 mm** y **3 mm**.
- Orientación del rodillo: Como se va a analizar la influencia de estos parámetros en un único paso de *prehemming*, se ha establecido que el ángulo de ataque del rodillo varíe entre **40°** y **50°**.
- Overhang: La distancia entre el final de la cama y el exterior de la pestaña variará desde **0 mm** a **1 mm**.

Se aplican los valores que acabos de determinar, según el diseño de experimento planteado:

VALOR	Distancia TCP – RTP (mm)	Orientación rodillo ( $\varphi^\circ$ )	Overhang (mm)
-1	2	40	0
0	2,5	45	0,5
1	3	50	1

Así que el **diseño de experimentos** para realizar mediante simulación en AutoForm y mediante ensayos experimentales es el siguiente:

Experimento	Distancia TCP – RTP (mm)	Orientación rodillo ( $\varphi^\circ$ )	Overhang (mm)
EXP. 1	2	40	0
EXP. 2	3	40	0
EXP. 3	2	50	0
EXP. 4	3	50	0
EXP. 5	2	40	1
EXP. 6	3	40	1
EXP. 7	2	50	1
EXP. 8	3	50	1

## 4. SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Cuando se ha establecido el diseño de experimentos hay que llevar estos experimentos a la práctica. El *robot roller hemming* es un proceso que produce deformación en la lámina de metal sometida a la operación, por lo que para poder estimar la influencia de estos factores en el *roll-in* final se necesita un paquete de análisis por elementos finitos. Para ello contamos con diferentes softwares de simulación, que nos permiten una aproximación al proceso cada día más detallada. Para nuestro análisis, hemos elegido el software AutoForm<sup>plus</sup> R7.

AutoForm es un software de simulación para industrias matriceras y de conformado de chapa metálica. Hemos elegido este programa ya que en sus últimas versiones incluye la herramienta de simulación del proceso *roller hemming*, lo que nos va a servir para controlar de manera precisa las variables específicas de la operación. Este módulo se llama AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup>.

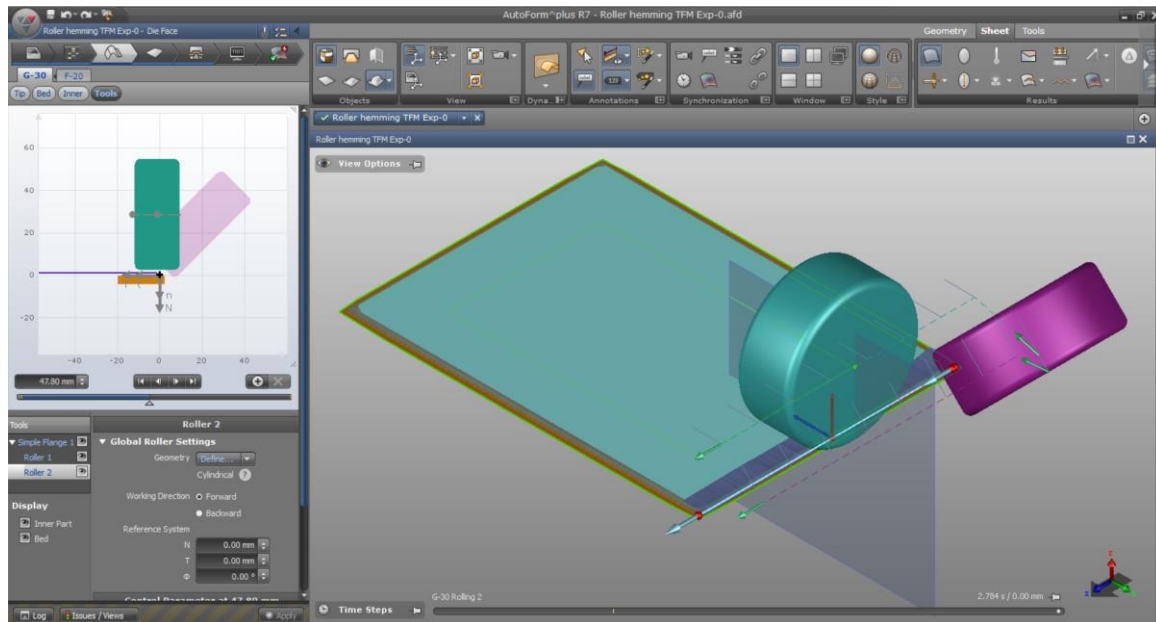


Ilustración 15. Herramienta roller hemming de AutoForm

Primeramente, se debe establecer un **experimento simulado que permita la repetibilidad del proceso de forma experimental lo más exacta posible**. El objeto final siempre va a ser medir el *roll-in*, por lo que se ha optado por una forma básica que facilita la medición y la pureza del resultado, haciendo posible la comparación de resultados y estimar de forma más clara el efecto de los distintos parámetros en el proceso.

Por ello se toma como base de experimentación una **lámina de acero DC03 con 0,88 mm de espesor**. La forma de las probetas será **rectangular de 100x150 mm con borde recto**.

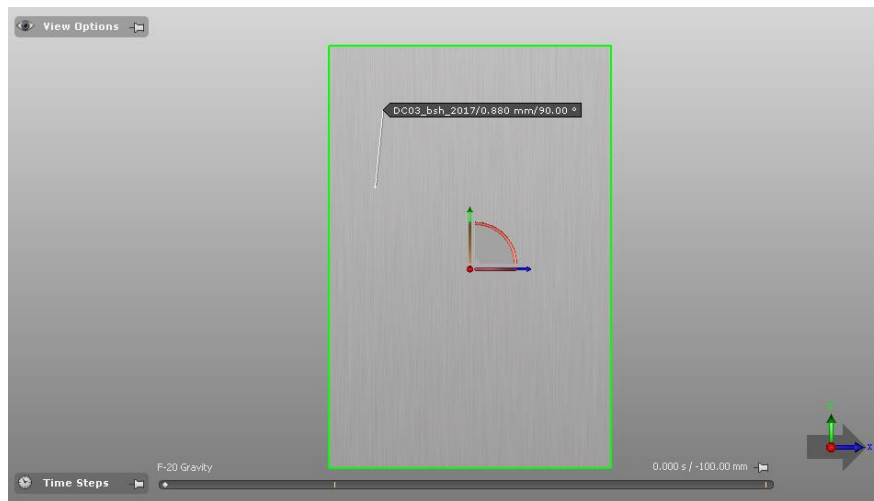


Ilustración 16. Lámina simulación AutoForm

Una vez establecida la probeta, se define el proceso para determinar los distintos parámetros. Hay que definir el radio de curvatura del *flanging*, en la simulación es un parámetro fácilmente modificable, por lo que se necesita reproducir un radio de curvatura de un doblado que podamos llevar a cabo de forma experimental. Para ello, establecemos un radio de curvatura interior de 1,60 mm y un exterior de 2,48 mm, que es lo que nos garantiza la reproducibilidad en el *flanging* de forma experimental con la herramienta del doblado disponible en el taller. Como se ha explicado anteriormente, se puede realizar la operación *roller hemming* con 1 o 2 pasos *prehemming*, y para cerrar el engrapado se realiza el *final hemming*. Para poder establecer un marco de experimentos con el que, posteriormente, se definirá el diseño de experimento para su análisis, es necesario realizar el proceso con 1 paso *prehemming*, ya que el ángulo de ataque del rodillo será uno de los parámetros a analizar, por lo que se necesita que se realice en un único paso, quedando de la siguiente forma:

1. *Flanging* a 90° (radio de curvatura interior de 1,60 mm).
2. *Prehemming* intermedio en un paso.
3. *Final hemming*.

Con todo establecido, se puede proceder con la simulación. La descripción del proceso en AutoForm viene detallada y especificada en el **ANEXO I**.

Una vez llevado a cabo todos los experimentos y terminado el tratamiento de datos, los **resultados** obtenidos son los siguientes:

Experimento	TCP - RTP distance (mm)	Orientación roller ( $\varphi^\circ$ )	Overhang (mm)	Roll-in $\frac{1}{4}$ (mm)	Roll-in $\frac{1}{2}$ (mm)	Roll-in $\frac{3}{4}$ (mm)	ROLL-IN media (mm)
Prehemming medio	2,5	45	0,5	0,138	0,016	0,276	0,143
EXP. 1	2	40	0	0,157	0,202	0,163	0,174
EXP. 2	3	40	0	0,475	0,338	0,031	0,281
EXP. 3	2	50	0	0,216	0,112	0,168	0,165
EXP. 4	3	50	0	1,023	0,778	0,303	0,701
EXP. 5	2	40	1	0,498	0,474	0,656	0,543
EXP. 6	3	40	1	0,064	0,019	0,344	0,142
EXP. 7	2	50	1	0,357	0,369	0,631	0,452
EXP. 8	3	50	1	0,419	0,291	0,027	0,246

## 5. ENSAYO EXPERIMENTAL

Se ha definido todo el proceso de simulación tratando de establecer condiciones reproducibles de forma experimental. Para ello se ha tenido en cuenta el equipo de experimentación disponible y se ha llevado a cabo en una célula de trabajo desarrollada dentro del taller del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Zaragoza.

Para reproducir el proceso *robot roller hemming* se necesita un brazo robótico que soporte las fuerzas de reacción de cada operación del proceso. A través del software de simulación, podemos obtener una estimación del rango de fuerzas máximo al que se verá sometido. Sin duda, esto ocurre durante el *final hemming*, que es cuando se realiza el pisado final y se produce el pico de mayor fuerza de reacción para el brazo articulado, por lo que, si podemos determinar este máximo, se puede establecer el rango máximo de la herramienta necesaria. La **fuerza máxima** que obtenemos es **1.700 N**, lo que supone un problema para los brazos robóticos a nuestro alcance, que son brazos de poca potencia para trabajos académicos.

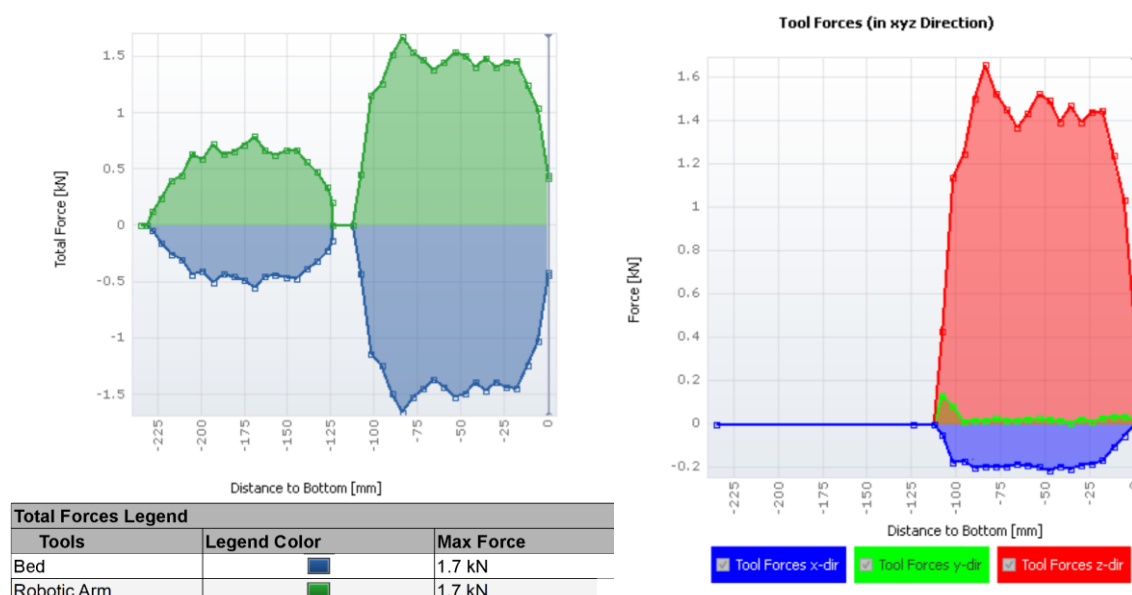


Ilustración 17. Gráficos de fuerzas del proceso roller hemming simulado

Para llevar a cabo nuestros experimentos, optamos por utilizar una fresadora, adaptando el utillaje para poder realizar el *roller hemming*. Aunque no es un trabajo específico para este tipo de máquinas, esta adaptación nos asegura que la fresa mecánica puede soportar fuerzas mucho mayores y garantiza la operación sin roturas. Para ello se opta por utilizar un rodamiento en las funciones del rodillo. Con estas gráficas también se puede observar que las fuerzas que debe soportar el rodamiento son sobre todo axiales, con una ligera carga radial que hay que tener en cuenta. Por ello se opta por un rodamiento rígido de bolas, que debe soportar perfectamente las fuerzas a los que se verá sometido durante el proceso. El rodamiento elegido es el 62304.2RSR, de dimensiones 21 x 52 mm, tal y como hemos determinado en la simulación.

Una vez tenemos la herramienta se preparan las probetas para hacer los ensayos. Para ello utilizamos chapas de acero DC03 de espesor 0,88 mm. Se realizan los cortes al tamaño deseado de 150 x 100 mm con borde recto y se realiza un doblado simple a 90° con una pestaña de 10 mm. Con el utillaje y las probetas, se puede proceder a la experimentación de las pruebas del diseño de experimento planteado.



Ilustración 18. Célula de trabajo roller hemming experimental

Para obtener los resultados de los ensayos experimentales para el diseño de experimento planteado, se procede a realizar una medida de después del *flanging* en la mitad de la lámina, y en las 2 cuartas partes, y la misma medida después del *final hemming*, para obtener 3 valores de *roll-in* por cada pestaña, al igual que la simulación.

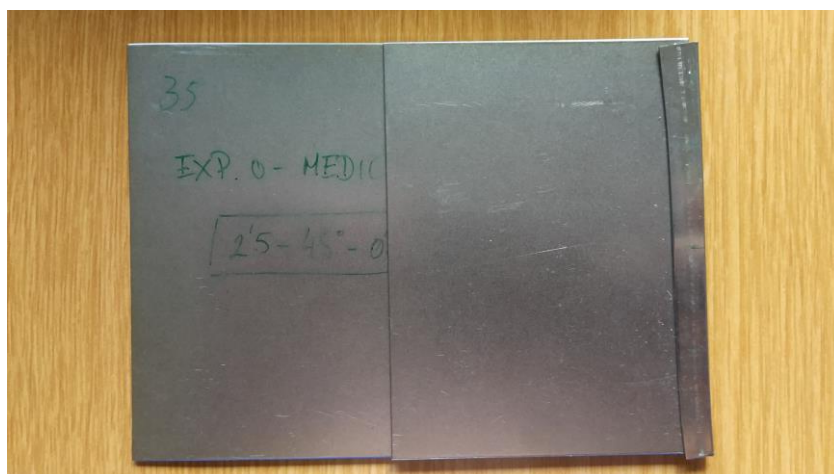


Ilustración 19. Probeta hemming final experimento

La descripción de esta célula y del proceso de experimentación y medida, junto a la documentación gráfica de los resultados obtenidos, viene detallada en el **ANEXO II** de esta memoria.

Dados los valores respuesta en los que nos estamos manejando, que son del orden de décimas de milímetro, los medios experimentales con los que contamos no nos garantizan la misma precisión que nos ofrece la simulación. Por ello, para el estudio se seleccionan 2 pruebas por cada experimento, y se saca la media para obtener el resultado final.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PROBETA	Experimento	TCP - RTP distance (mm)	Orientación roller ( $\varphi^\circ$ )	Overhang (mm)	Roll-in $\frac{1}{4}$ (mm)	Roll-in $\frac{1}{2}$ (mm)	Roll-in $\frac{3}{4}$ (mm)	ROLL-IN media (mm)
35	EXP. 0	2,5	45	0,5	0,110	0,330	0,430	0,290
15	EXP. 1	2	40	0	-0,430	-0,090	0,000	-0,173
18	EXP. 2	3	40	0	0,760	1,210	1,370	1,113
20	EXP. 3	2	50	0	0,480	0,900	1,030	0,803
34	EXP. 4	3	50	0	1,730	2,480	2,900	2,370
22	EXP. 5	2	40	1	-0,290	-0,190	-0,230	-0,237
23	EXP. 6	3	40	1	0,060	0,220	0,220	0,167
24	EXP. 7	2	50	1	-0,200	-0,180	-0,110	-0,163
36	EXP. 8	3	50	1	0,840	1,250	1,520	1,203
16	EXP. 1	2	40	0	-0,420	-0,200	-0,170	-0,263
37	EXP. 2	3	40	0	0,680	0,960	1,140	0,927
27	EXP. 3	2	50	0	0,290	0,610	0,710	0,537
28	EXP. 4	3	50	0	1,480	1,910	2,060	1,817
30	EXP. 5	2	40	1	-0,330	-0,280	-0,290	-0,300
38	EXP. 6	3	40	1	0,020	0,300	0,360	0,227
32	EXP. 7	2	50	1	-0,320	-0,190	-0,170	-0,227
33	EXP. 8	3	50	1	0,880	1,400	1,780	1,353

	Experimento	TCP - RTP distance (mm)	Orientación roller ( $\varphi^\circ$ )	Overhang (mm)	ROLL-IN media (mm)
MEDIA	EXP. 1	2	40	0	-0,218
	EXP. 2	3	40	0	1,020
	EXP. 3	2	50	0	0,670
	EXP. 4	3	50	0	2,093
	EXP. 5	2	40	1	-0,268
	EXP. 6	3	40	1	0,197
	EXP. 7	2	50	1	-0,195
	EXP. 8	3	50	1	1,278

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Gracias al paquete específico de *roller hemming*, el programa de simulación nos permite la captación de resultados de una manera cómoda y sencilla. Sin embargo, solo disponemos de los valores absolutos, por lo que necesitamos interpretar estos resultados conforme a los diferentes experimentos realizados.

Para estudiar el diseño de experimentos planteado, procedemos a analizar los resultados obtenidos mediante el software estadístico Minitab. Minitab es un programa diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Combina una gran capacidad de ejecución de análisis estadísticos con una interfaz amigable para poder presentar los resultados obtenidos. Una vez realizados los experimentos e ingresados los resultados, Minitab proporciona varias herramientas analíticas y gráficas para ayudar a interpretar los resultados y poder analizarlos.

### 6.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Se ha procedido a la introducción de los valores de la simulación recopilados en la tabla de resultados, de los que se puede obtener cuál es la respuesta del *roll-in* según las variaciones de los parámetros de entrada del proceso en AutoForm. Vamos a exponer estos resultados con ayuda de varios gráficos que faciliten su comprensión.

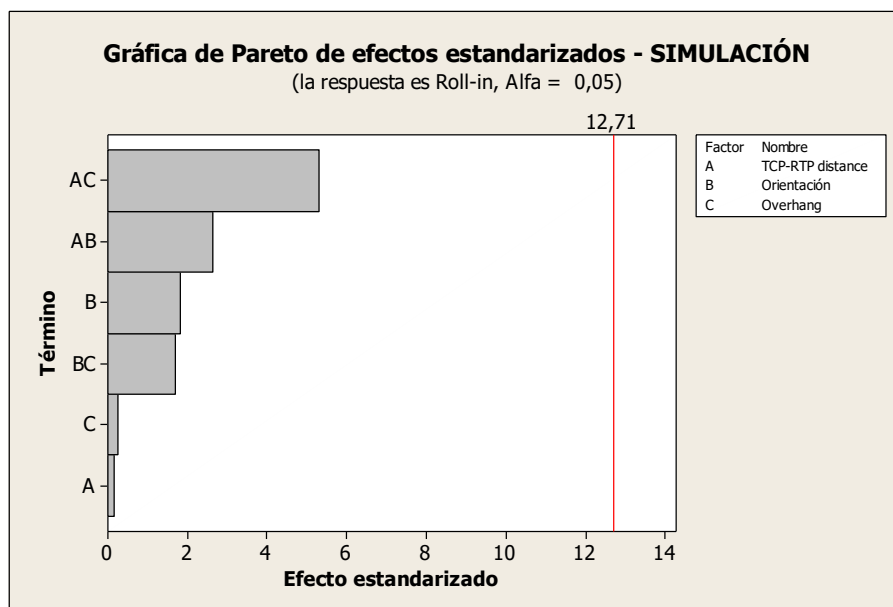


Ilustración 20. Gráfica de Pareto de efectos estandarizados de la simulación



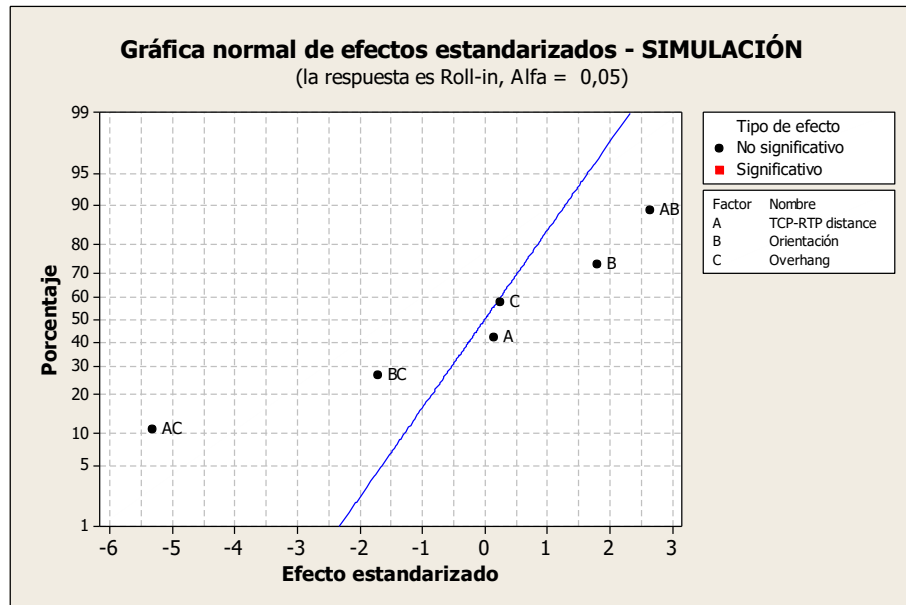


Ilustración 21. Gráfica normal de efectos estandarizados de la simulación

Con estas gráficas vamos a analizar cómo afectan al *roll-in*, tanto los efectos principales por separado, como la interacción entre ellos de dos en dos.

Tanto en la **gráfica de Pareto**, como en la **gráfica normal de los efectos**, se puede apreciar cuáles son los factores estadísticamente relevantes. En el primero, los valores que tienen una influencia muy por encima del resto son los que sobrepasan la línea roja, mientras que, en la normal, se ven los factores significativos en rojo, con mayor influencia estadística en la variable respuesta cuanto más alejado se encuentra de la línea azul de tendencia.

En las gráficas de Pareto y normal de los efectos no se muestra que ningún factor principal, ni la interacción entre ellos tenga una influencia estadística significativa. Los datos más relevantes que aportan estas dos gráficas es los factores principales no aportan indicios de que tengan una influencia directa en el *roll-in* por separado. El factor más relevante detectado dentro del proceso es la interacción entre la distancia TCP-RTP y el overhang. Lo más reseñable es que siendo la interacción de la distancia TCP-RTP con el overhang y con la orientación del rodillo los dos factores que se han detectado mayor influencia en la variable respuesta, la distancia TCP-RTP por separado es el factor menos relevante según los datos de nuestro diseño.

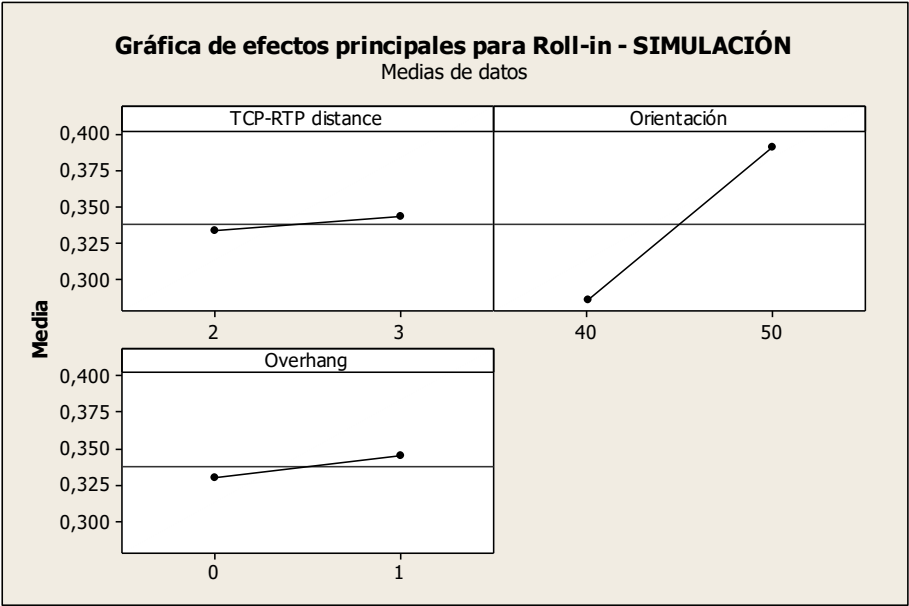


Ilustración 22. Gráfica de efectos principales de la simulación

La **gráfica de efectos principales** muestra la variación y el tipo de relación de cada factor principal respecto la variable respuesta por separado. Eso es importante no solo para saber qué factores son más influyentes, si no para saber cuantificar cuánto influye y de qué manera lo hace. Cuanto mayor es la pendiente, mayor variación en la respuesta, indicando mayor influencia. Tal y como se indicaba con las gráficas anteriores, a pesar de que no fuera estadísticamente relevante, el único efecto principal que muestra una pendiente relevante es la orientación del rodillo. Eso significa que cuanto mayor es el ángulo de ataque del rodillo durante el *prehemming*, mayor *roll-in* aparece en la pestaña final.

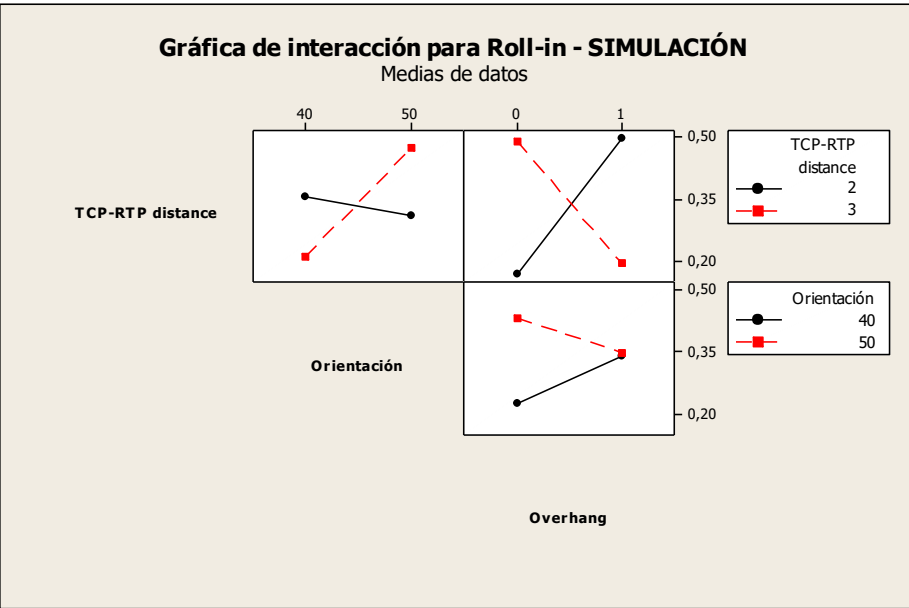


Ilustración 23. Gráfica de interacción de los efectos de la simulación

Por último, la **gráfica de interacción** muestra la relación de los distintos parámetros entre sí. Cuanto más paralelas son las líneas de respuesta de los dos factores, indica que la variación de esos parámetros influye de menor manera en la variable respuesta, por lo que no es influyente la interacción entre ellos. Por el contrario, si las líneas tienen distinta pendiente, indica que la interacción entre ellos tiene influencia en la variación de la respuesta y esa variación indica de qué manera influye. Como estamos mostrando la interacción entre dos factores, en este caso podemos notar la importancia de la relación entre sí si ambas líneas tienen tanta pendiente inversa como para cruzarse. Al igual que en el caso anterior, se confirma que la interacción entre la distancia TCP-RTP, tanto con la orientación del rodillo, como con el overhang, son las dos interacciones que muestran mayor influencia, tal y como mostraban las gráficas iniciales de Pareto y normal.

## 6.2 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Ya se han analizado los resultados de la simulación estadísticamente. Ahora vamos a proceder a hacer lo mismo con los resultados de los experimentos en laboratorio. En el punto anterior se ha introducido cómo se interpretan estas gráficas, así que se va a analizar directamente el significado de cada una de ellas. Aunque las conclusiones se sacarán en los apartados siguientes, se va a tratar de establecer las primeras comparaciones entre los resultados de la simulación y la experimentación en taller.

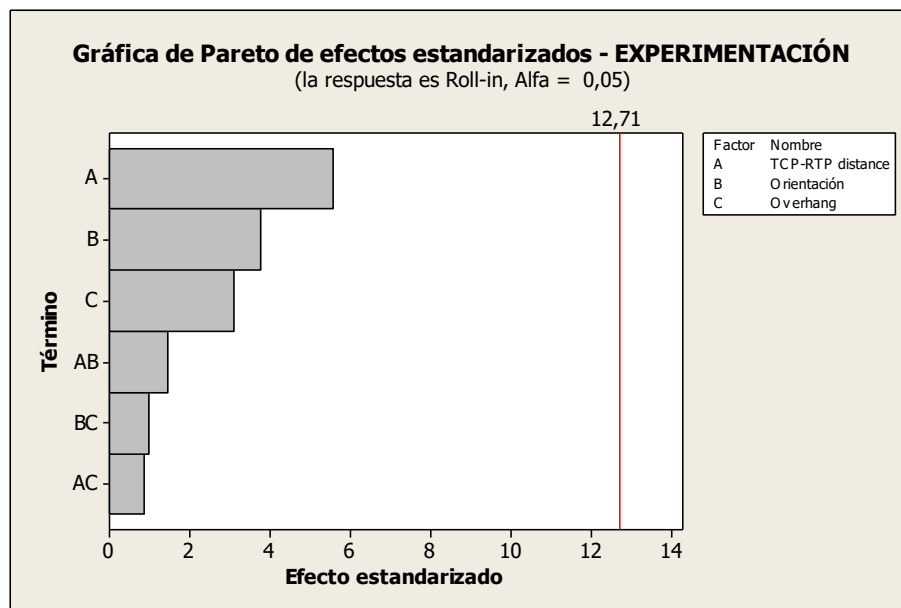


Ilustración 24. Gráfica de Pareto de efectos estandarizados de la experimentación

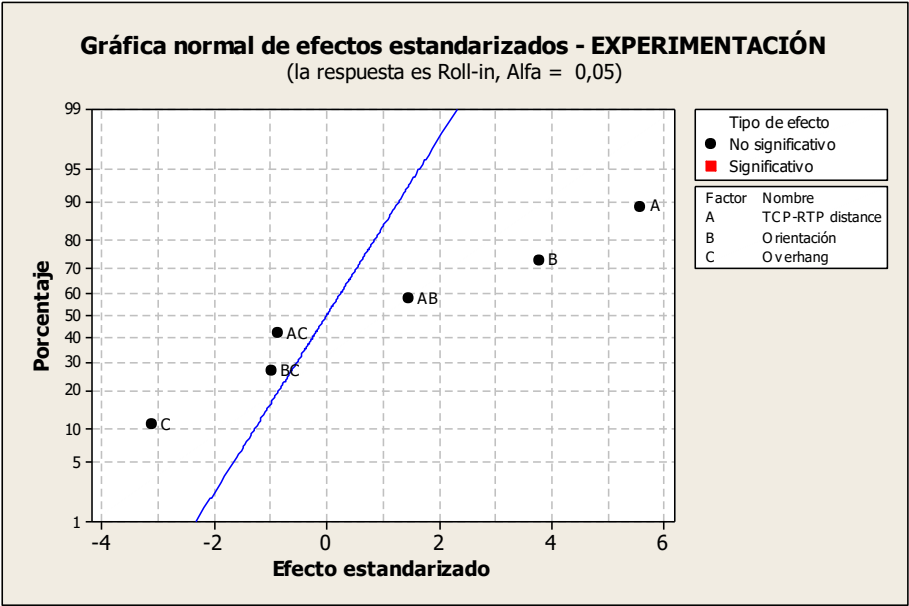


Ilustración 25. Gráfica normal de efectos estandarizados de la experimentación.

En la **gráfica de Pareto y en la normal de los efectos** de la experimentación en taller se muestran resultados diferentes con respecto a la simulación. En este caso, siguen sin aparecer factores que muestren una influencia significativa. Sin embargo, la relevancia de los factores aparece en distinto orden, para este diseño de experimento los efectos principales tienen mayor influencia que la interacción entre ellos, siendo la distancia TCP-RTP y la orientación del rodillo los factores más relevantes, casi al contrario que en el análisis estadístico de la simulación.

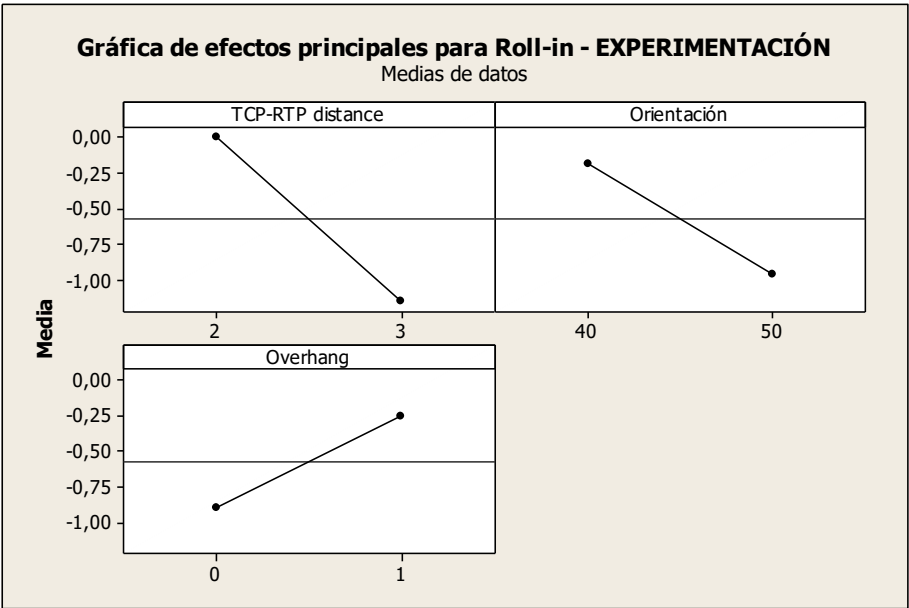


Ilustración 26. Gráfica de efectos principales de la experimentación

Según se ha explicado en el apartado interior, en este caso sí que aparece cierta influencia de los tres efectos en la **gráfica de efectos principales**, tal y como se puede apreciar en la diferencia de pendiente de estos efectos. Pero lo más significativo es que estos factores principales aportan los tres un *roll-in* negativo, mientras que para la simulación eran todos positivos. Además, cabe destacar que la relación entre los dos factores más relevantes, la distancia TCP-RTP y la orientación del rodillo, es inversa respecto al *roll-in*, cuando aumenta el factor, se reduce el enrollamiento, es decir aparece *roll-out* hacia fuera, el principal problema durante la experimentación en el laboratorio.

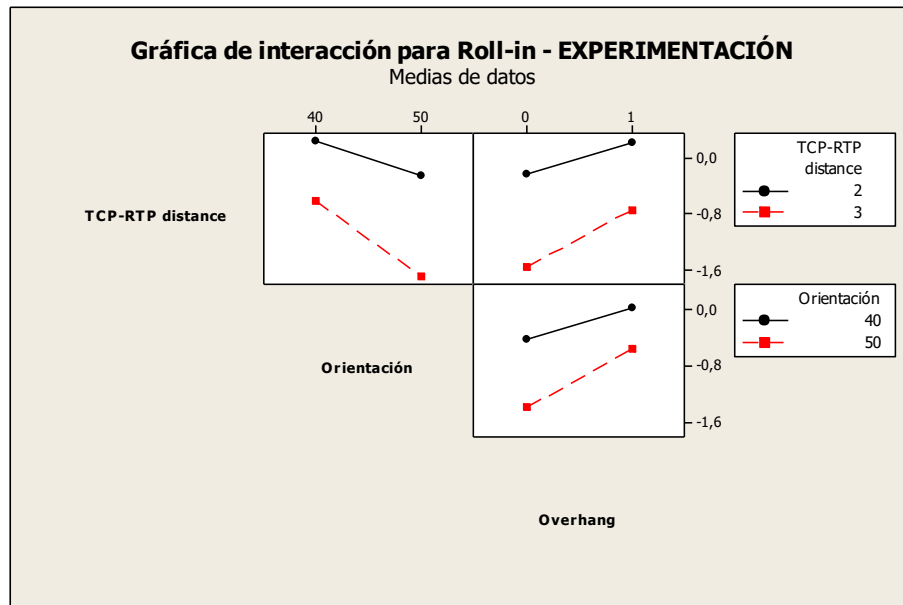


Ilustración 27. Gráfica de interacción de los efectos en la experimentación

Sin embargo, otra vez al contrario que en la simulación, en la **gráfica de la interacción de los efectos** se muestran unas líneas paralelas que indican que influyen en la variable respuestas de una manera parecida, lo que significa que, según los resultados experimentales, la interacción entre factores no aporta ninguna conclusión estadística.

En una comparación rápida entre todos los datos aportados se muestra que no se pueden establecer similitudes de tendencia entre los parámetros de entrada y su efecto sobre el *roll-in* entre los resultados de la simulación y la experimentación.

## 7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad de este proceso se ha evaluado el diseño de experimentos de cada grupo de experimentos por separado, tanto la simulación, como el ensayo experimental. Sin embargo, el principal objetivo de este trabajo era intentar obtener una comparativa entre la simulación ofrecida por el nuevo módulo de AutoForm y el proceso real llevado a cabo en el laboratorio. Esto debería servir para validar los resultados de ambos experimentos o, por el contrario, identificar e intentar acotar las partes críticas de este proceso, ya que el módulo de simulación está en sus primeras fases de desarrollo y la célula de trabajo del taller se ha realizado con los medios disponibles al alcance de un estudio académico simple. Teniendo en cuenta estos detalles, se procede con la comparación analítica.

Primeramente, la comparación directa cuantitativa no da indicios de la existencia de una relación entre los resultados de ambas experimentaciones, ni en valores absolutos de la variable, ni en tendencias de respuesta.

Experimento	TCP - RTP distance (mm)	Orientación roller ( $\varphi^\circ$ )	Overhang (mm)	ROLL-IN SIMULACIÓN (mm)	ROLL-IN EXPERIMENTACIÓN (mm)
EXP. 1	2	40	0	0,174	-0,218
EXP. 2	3	40	0	0,281	1,020
EXP. 3	2	50	0	0,165	0,670
EXP. 4	3	50	0	0,701	2,093
EXP. 5	2	40	1	0,543	-0,268
EXP. 6	3	40	1	0,142	0,197
EXP. 7	2	50	1	0,452	-0,195
EXP. 8	3	50	1	0,246	1,278

Como hemos visto en los análisis de cada uno del grupo de experimentos, el diseño de experimentos no aporta similitudes significativas para sacar conclusiones a la hora de comparar la simulación y la experimentación en la célula de trabajo desarrollada.

Esto se puede ver más claramente al observar las gráficas de cubos obtenidas por Minitab. La gráfica de cubos muestra la relación entre los factores y la respuesta, donde las medias de los datos son el promedio de los datos sin procesar para cada combinación de niveles de factor. De esta forma, con las gráficas de cubos se puede observar los máximos y mínimos de la variable *roll-in*, para ver más claramente los rangos de respuesta. Si comparamos ambos gráficos, se puede ver fácilmente que los rangos de respuesta obtenidos para un mismo grupo de experimentos, con los mismos factores, no ponen de manifiesto correlación entre los resultados obtenidos.

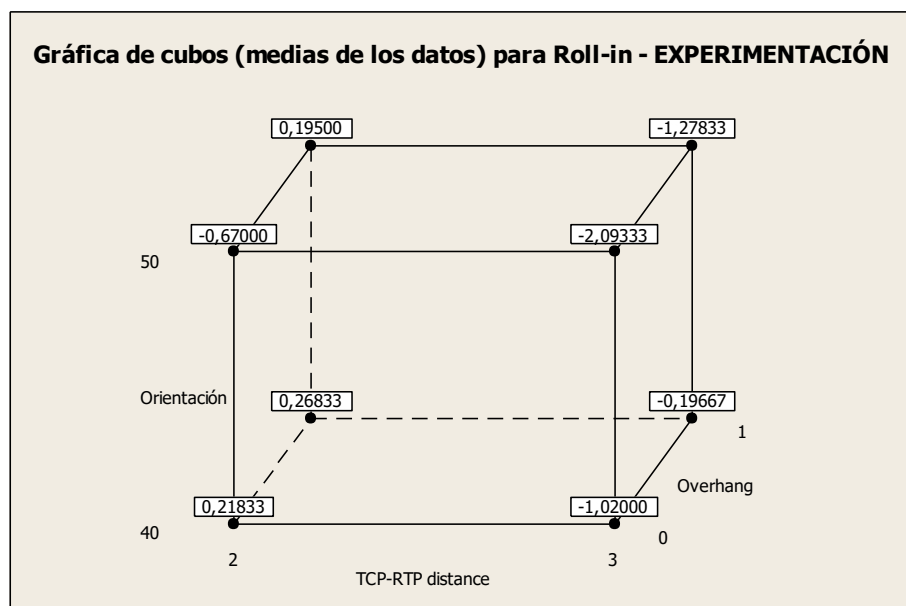
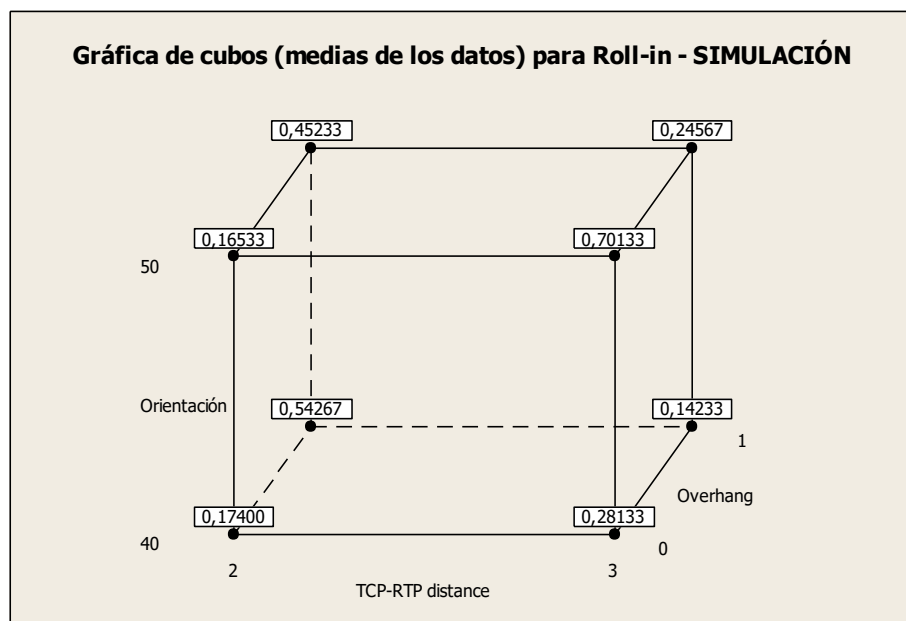


Ilustración 28 Gráficas de cubos de la experimentación (arriba) y la simulación (dcha.)

Sin embargo, el hecho de que no exista correlación aparente también aporta ciertas conclusiones que hay que tener en cuenta. El estudio previo del proceso y la experiencia durante la realización del ensayo ha proporcionado información útil para tener en cuenta a la hora de estudiar un proceso que no contaba con muchos estudios previos de este tipo.

Además, el hecho de haber contado con un software recién implementado para este proceso, y haber comparado mediante un sistema de experimentación propio, también indica mejoras en ambos procesos y líneas futuras de investigación, que se van a tratar específicamente a continuación.

## 8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Una vez terminado todo el proceso y analizados los resultados obtenidos hay que poner en común todo lo observado para sacar conclusiones respecto al análisis de sensibilidad. Aunque inicialmente no se puedan establecer relaciones directas comparando los resultados obtenidos de la simulación con los obtenidos de la experimentación en laboratorio, precisamente, sí que se puede conjeturar por qué estos datos no coinciden.

Para ir por partes, se va a empezar por la parte de simulación. El módulo de AutoForm específico para este proceso que se ha utilizado se encuentra en sus primeras fases de desarrollo, y eso siempre conlleva cierta acotación en todo lo que se puede hacer con él, mientras los desarrolladores lo van mejorando. A pesar de ello, cabe destacar el buen trabajo que se ha llevado a cabo para ofrecer este módulo tan específico tan bien implementado con el programa principal. Ofrece una variedad muy amplia para abarcar todos los procesos de *roller hemming* y la precisión con la que trabaja es imposible de alcanzar por el método experimental. En nuestro caso, ha habido que tener especial atención con las colisiones de las herramientas con la probeta a estudiar. Para simular lo más exacto posible el proceso experimental, se han tenido que suavizar los contactos para poder obtener una convergencia en los cálculos del programa. Aún así, creemos que esta parte ha sido bastante fiel a la experimentación y no ha afectado los resultados.

En cambio, el mayor problema que se ha encontrado durante la experimentación en laboratorio es la desviación de la pestaña hacia fuera por la **existencia de fuerzas tangenciales o momentos** durante el avance del rodillo, que **en la simulación no se han visto reflejadas**, o aparecían de forma mínima, tanto que no se habían tenido en cuenta para diseñar el proceso experimental. **Cuanto más abierta queda la pestaña** después del *prehemming*, mayores fuerzas tangenciales aparecen y **más difícil es cerrar el engrapado** por completo. Eso ha conllevado la limitación del rango de estudio de los parámetros de entrada, ya que nos daban fallo durante la experimentación, lo que supone que el alcance del análisis de sensibilidad es menor y es más complicado detectar la influencia de los distintos factores en el *roll-in*. El software nos dejaba aplicar un rango mucho más amplio sin mostrar ninguna anomalía, eso hubiera hecho que el análisis estadístico fuera mucho más preciso y haber detectado mejor cómo influye cada factor en la variable respuesta. Sin embargo, la amplitud de cada parámetro ha venido limitado por el mayor rango posible de la experimentación, sobre el que ha habido un trabajo previo de definición de rango posible de trabajo. Por todo ello, una línea futura de trabajo a desarrollar sería la simulación de este proceso con un software genérico, comparar resultados e interaccionar con el desarrollador de AutoForm para ver las posibles mejoras del programa que no tuvieran en cuenta respecto al proceso real.

Pero es en la parte de la experimentación en laboratorio donde más dudas aparecen a la hora de analizar los resultados obtenidos. Nos encontramos en un proceso mecánico donde la precisión de cada operación es de orden del milímetro, mientras que para la variable respuesta nos vamos hasta el orden de décima de milímetro. Para medir el *roll-in* se ha utilizado un calibre digital con una precisión de centésima de milímetro, por lo que, tras una buena calibración, se puede afirmar que los resultados obtenidos son bastante fiables. Es a la hora de la preparación de los parámetros de entrada donde nos encontramos mayores dificultades a la hora de encontrar la precisión adecuada. De los tres factores de estudio, la orientación del rodillo es fácilmente medible gracias al cabezal graduado de la fresa. Es en los



otros dos donde **el diseño no permite la precisión necesaria para garantizar la repetibilidad exacta del proceso** con los medios a nuestro alcance. El proceso experimental viene definido en el ANEXO 1, donde se explica cómo se lleva a cabo la preparación de la distancia TCP-RTP y el overhang. El manejo de los distintos grados de libertad de la mesa de trabajo y la herramienta de la fresadora mecánica presentan un juego mecánico que no permite la precisión necesaria requerida para estos experimentos. Se han intentado acotar, pero es un factor importante de distorsión de los parámetros de entrada.

Por último, otra variable importante que ha aparecido durante el proceso es el giro de la herramienta respecto al portaherramientas. El portaherramientas está anclado al cabezal de la fresadora mediante unos engranajes, que proporcionan varias posiciones de giro, pero no fijan completamente la movilidad, apareciendo un pequeño giro en el encaje de la posición final que necesites para realizar el desplazamiento del rodillo a lo largo de la pestaña. No es mucho problema durante el *prehemming* ya que la fuerza resultante no es muy grande y se puede sujetar la herramienta en una posición fija, pero durante el *final hemming*, tal y como se ha comentado anteriormente, al aparece fuerzas tangenciales y momentos de giro más importante, este problema favorecería al desplazamiento de la pestaña hacia fuera, ya que **el giro de la herramienta hacía que se orientara con estas fuerzas** que no estaban contempladas en el diseño inicial y reducía todavía más el rango de las operaciones.

Con todas estas dificultades, una conclusión clara es que, para la parte experimental, el hecho de haber intentado realizar un solo paso de *prehemming* para simplificar el proceso, en lugar de abordar el proceso en más etapas, ha limitado el estudio.

Por ello, la primera línea de estudio futuro para mejorar este trabajo sería claramente **imponer el proceso roller hemming en tres pasos**. Si se realiza **un paso intermedio más de prehemming**, la pestaña se va cerrando de manera más controlada, con lo que las fuerzas y momentos que aparecerán serán muy inferiores a las que hemos tenido en este trabajo. Esto permitirá que el rango de trabajo sea mucho más amplio y se pueda realizar un análisis con mejor sensibilidad en el proceso.

De hecho, eso explica por qué en la industria el proceso *roller hemming* en tres pasos es el más extendido. Al no haber estudios concluyentes para anticipar los defectos en esta operación, realizar el proceso de la manera más controlada es la solución más efectiva.

Todo esto tiene que desembocar en tratar de poder **medir, controlar y anticipar el enrollamiento en cada paso del proceso**, ya que hemos podido observar cómo en los pasos del *prehemming* hay un *roll-in* positivo, ya que se empuja hacia dentro la chapa. Pero en el *final hemming*, al cerrar el engrapado, se produce el efecto contrario, compensado el *roll-in* final. Como la variabilidad en el *roll-in* del *final hemming* se ha detectado que tiene mucha variación experimentalmente, dependiendo de lo abierta que esté la pestaña, llega a cuantificar cómo afecta cada variable a este defecto, y trabajar para llegar a medir el enrollamiento final dentro de un rango de las variables de entrada, sería un gran avance para el *roller hemming*.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Burchitz, I., Fritsche, D., Grundmann, G., & Hillmann, M. (2011). **Efficient planning and numerical analysis of industrial hemming processes**. *8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3d Sheet Metal Forming Processes (Numisheet 2011), Pts a and B*, 1383, +.
2. Hu, X., Lin, Z. Q., Li, S. H., & Zhao, Y. X. (2010). **Fracture limit prediction for roller hemming of aluminum alloy sheet**.
3. Jonkers, B. (2006). **Simulation of the Robot Roller Hemming process**. *Master thesis*. Voestalpine Polynorm Automotive and University of Twente.
4. Le Maoût, N., Thuillier, S., & Manach, P. (2010a). **Classical and roll-hemming processes of pre-strained metallic sheets**. *Experimental Mechanics*, 50(7), 1087-1097.
5. Le Maoût, N., Thuillier, S., & Manach, P. Y. (2010b). **Drawing, flanging and hemming of metallic thin sheets: A multi-step process**. *Materials & Design*, 31(6), 2725-2736.
6. Limon-Leyva, P a ( 1 ), Ledesma-Orozco, E r ( 2 ), Aguilera-Gómez, E ( 2 ), Plascencia-Mora, H ( 2 ), De Jesús Balvantín-García, A ( 2 ), & Diosdado-De La Peña, J a ( 2 ). (2017). **Parametric optimization of linear roll-hemming process for metal sheets**. *Dyna (Spain)*, 92(5), 552-559.
7. Lin, G., Hu, S. J., & Cai, W. (2009). **Evaluation of formability in bending/hemming of aluminum alloys using plane-strain tensile tests**. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131(5), 51009.
8. Livatyali, H., & Larris, S. J. (2004). **Experimental investigation on forming defects in flat surface-convex edge hemming: Roll, recoil and warp**.
9. Livatyali, H., Laxhuber, T., & Altan, T. (2004). **Experimental investigation of forming defects in flat surface-convex edge hemming**.
10. Livatyali, H., Müderrisoğlu, A., Ahmetoğlu, M. A., Akgerman, N., Kinzel, G. L., & Altan, T. (2000). **Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design**.
11. Muderrisoglu, A., Murata, M., Ahmetoglu, M. A., Kinzel, G., & Altan, T. (1996). **Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet—an experimental study**.
12. Thuillier, S., Le Maout, N., Manach, P. Y., & Debois, D. (2008). **Numerical simulation of the roll hemming process**. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3), 226-233.
13. Zhang, G., Wu, X., & Hu, S. J. (2001). **A study on fundamental mechanisms of warp and recoil in hemming**. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123(4), 436.